ANÁLISE ESTATÍSTICA DA INTENSIDADE DO USO DE ENERGIA DE EDIFICAÇÕES ESCOLARES NO BRASIL: PROPOSIÇÃO DE *BENCHMARKING* SIMPLIFICADO

Matheus Soares Geraldi (1); Mateus Bavaresco (2); Veronica Gnecco (3); Leticia Dalpaz (4); Enedir Ghisi (5) Michele Fossati (6)
(1) Mestre, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, matheus.s.geraldi@gmail.com
(2) Mestre, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, bavarescomateus@gmail.com
(3) Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, veronicamgnecco@gmail.com
(4) Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, ledalpaz@gmail.com
(5) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, enedir.ghisi@ufsc.br
(6) Doutora, Professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, michele.fossati@ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Caixa Postal 476, Florianópolis - SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721-2115

RESUMO
Este estudo apresenta uma proposição de benchmarking estatístico do estoque de edificações escolares no Brasil. Informações de consumo de energia, área construída, número de alunos e localização (zona bioclimática) de 2.445 escolas foram utilizadas para se calcular indicadores de intensidade de uso de energia (EUI) em termos de área construída e número de alunos, realizando-se também uma transformação logarítmica para garantir aderência à distribuição normal. Esses indicadores foram analisados por meio de teste de normalidade, desenvolvimento de histogramas, cálculo de medidas de síntese estatística, e determinação de um *benchmarking* estatístico por meio de normalização simples. Além disso, uma análise de variância (ANOVA) foi aplicada para verificar se o EUI apresenta variação estatística em relação às diferentes zonas bioclimáticas observadas. Resultados apresentam valores típicos de EUI por área construída e por número de alunos para o estoque de edificações e o *benchmarking* estatístico apresenta valores limites para classificação do desempenho operacional dessas edificações de "A" (melhor desempenho) até "E" (pior desempenho). O teste estatístico ANOVA apontou que há variação dos valores médios dos EUIs para diferentes zonas bioclimáticas. Conclusões apontam que o método utilizado para *benchmarking* é válido para uma abordagem primária, porém é limitado por não considerar como parâmetro a localidade da edificação, identificado como importante no teste estatístico empregado. Dessa forma, evidencia-se a necessidade de um método mais robusto para representar o *benchmarking* energético de edificações no Brasil.

Palavras-chave: *benchmarking* energético, uso de energia em edificações, estoque de edificações, edificações escolares.

ABSTRACT
This study presents a statistical analysis of a dataset representing the Brazilian school building stock. Information regarding energy consumption, gross-floor area, number of students and climate zone of 2,445 schools were used to calculate the energy use intensity indicator (EUI) in terms of gross-floor area and number of students. A log-transformation was applied to assure the normality of the data. Those indicators were analysed through normality testing, histogram developing, statistical synthesis metrics, and simple normalisation benchmarking. A variance test (ANOVA) verified the variability of the EUI regarding different climate zones. Results showed typical values of EUI in terms of gross-floor area and number of students of the school building stock in Brazil, and the statistical benchmarking presented limit values to classify the operational performance of buildings from "A" (higher performance) to "E" (lower performance). The ANOVA test evidenced significant variability in EUI considering different climatic zones. Conclusions pointed out that the method employed for benchmarking is valid as a first approach. Still, it is limited once it does not consider climatic variables as a parameter, which was identified as an important factor in the statistical test. In this way, there is a need for a robust method for benchmarking buildings in Brazil.

Keywords: energy benchmarking, energy use in buildings, building stock, school buildings.

1. INTRODUÇÃO

O setor de energia é um dos principais responsáveis pelo impacto humano no meio ambiente. Este impacto está relacionado à emissão de gases de efeito estufa pela produção de energia e contribui diretamente para as mudanças climáticas (IEA, 2013). No ano de 2019, as edificações contribuíram com cerca de 52% do consumo de energia no Brasil (BRASIL, 2020). Com isso, é necessário melhorar a eficiência energética das edificações para garantir um desenvolvimento sustentável. Contudo, para aplicar medidas realmente efetivas é necessário conhecer o desempenho das edificações.

O *benchmarking* energético é uma prática para avaliação do desempenho operacional de edificações. Nessa prática, o desempenho anual de uma edificação é comparado com um *benchmark*, ou seja, um desempenho de referência representativo do estoque de edificações (CHUNG, 2011). A comparação evidencia se o edifício analisado é eficiente frente ao estoque de edificações similares. Os componentes principais do *benchmarking* são: o índice de desempenho do edifício; o estoque de edificações; e o método para quantificação e comparação (MENG;HSU; HAN, 2017). No entanto, um desafio encontrado é a falta de dados disponíveis para composição do estoque de edificações, uma vez que não há políticas públicas, diretrizes, orientações e padronizações de medição, verificação e disponibilidade dos dados de consumo de energia nos edifícios no Brasil.

A intensidade de consumo de energia (do inglês *Energy Use Intensity*, EUI) é o indicador geralmente utilizado para mensurar o desempenho energético. Ele é definido como a quantidade anual de energia consumida por área construída por ano, expresso em kWh/m²/ano (DE WILDE, 2014). Porém, trabalhos que estudaram *benchmarking* de edificações escolares evidenciaram a necessidade de se realizar a avaliação comparativa com indicadores diferentes, de forma a se obter uma avaliação mais completa (PEREIRA *et al.*, 2014). Alguns autores defendem que outras unidades devem ser utilizadas, se aplicáveis, como kWh/m²/ano/pessoa, ou kWh/ano/pessoa (GERALDI; GHISI, 2020; SALLEH; KANDAR; SAKIP, 2016).

Quanto ao estoque de edificações, faz-se necessária uma quantidade representativa de dados de um grupo de edificações para que se possa modelar o estoque. Dependendo do método de *benchmarking*, a quantidade e o tipo de informações se diferem, mas em todos os métodos há necessidade um banco de dados de consumo de energia, área construída e ocupação das edificações (BORGSTEIN; LAMBERTS; HENSEN, 2016). Essas características proporcionam uma análise dos parâmetros que referenciam o *benchmark* (GOLDSTEIN; ELEY, 2014). Além disso, a análise deve ser realizada utilizando a informação de energia final (faturada), pois há a consideração do comportamento do usuário e do clima no qual a edificação está inserida (BORGSTEIN; LAMBERTS, 2014).

Quanto ao método para quantificação e comparação, existem diversas técnicas utilizadas para *benchmarking* na literatura. A revisão de Chung (2011) classifica esses métodos como: Normalização simples (BOEMI *et al.*, 2011; TAYLOR *et al.*, 2018); Análise de Regressão (ou Mínimos Quadráticos Ordinários (OLS)) (HONG *et al.*, 2014; PAPADOPOULOS; KONTOKOSTA, 2019); Análise Envoltória de Dados (DEA) (LEE, 2009); Análise de Fronteira Estocástica (SFA) (BUCK; YOUNG, 2007; YANG, ROTH; JAIN, 2018); e outros métodos mais avançados, como abordagem geoestatística (KOO; HONG, 2015; ÖSTERBRING *et al.*, 2018) e aprendizado de máquina (CHUNG; YEUNG, 2017).

Diante do exposto, existe a necessidade de determinação de métodos de *benchmarking* para edificações no contexto brasileiro. O CBCS (Conselho Brasileiro de Construção Sustentável) criou uma iniciativa de *benchmarking* para agências bancárias, edifícios públicos e edifícios de escritórios corporativos (BORGSTEIN e LAMBERTS, 2014). No entanto, edificações escolares ainda carecem de estudo nesse sentido. No Brasil, o desempenho energético desta tipologia ainda é pouco estudado. Destacam-se os estudos de Saraiva *et al.* (2019) sobre a avaliação de conforto térmico em escolas de diferentes estados, em Juiz de Fora (MG) e Macapá (AP), e de Geraldi e Ghisi (2020b) sobre o mapeamento do estoque nacional de edificações escolares a partir de uma abordagem integrativa.

Em outros países, outros estudos avaliaram o desempenho energético de escolas, como por exemplo: identificação de indicadores de desempenho (LOURENÇO; PINHEIRO; HEITOR, 2014); lições aprendidas em *retrofits* (BURMAN; KIMPIAN; MUMOVIC, 2018; ZINZI *et al.*, 2016); avaliação geral do desempenho (GIUDICE *et al*., 2013); modelagem do estoque (BURMAN; KIMPIAN; MUMOVIC, 2018; KIM *et al.*, 2019; WANG, 2019); análise de agrupamento (MARRONE; GORI, 2018); e experiências com certificação (SCOFIELD; DOANE, 2018).

Dessa forma, uma modelagem estatística do estoque de edificações escolares de ensino fundamental e médio no Brasil é uma oportunidade para se verificar como é o desempenho dessas edificações em relação aos seus aspectos determinantes, e quais os valores típicos de desempenho.

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é propor um *benchmarking* estatístico do consumo de energia de edificações escolares de ensino fundamental e médio da rede estadual no Brasil. O método de *benchmarking* utilizado para a obtenção de valores de referência foi a normalização simples, de forma que a obtenção dos valores típicos do estoque pode ser interpretada como os quartis do banco de dados que representa o estoque de edificações. Além disso, foi utilizada uma análise de variância para determinar se os indicadores de desempenho variam em diferentes localidades no Brasil e suas zonas bioclimáticas, e as medidas de síntese estatística (média, mediana) proporcionam um panorama geral do desempenho desta tipologia no Brasil. É importante salientar que um *benchmarking* mais robusto, considerando modelagem de arquétipos, é pertinente para uma análise mais precisa. No entanto, este artigo realiza uma análise preliminar.

3. MÉTODO

O método empregado neste estudo consiste em quatro etapas descritas na sequência.

3.1. Caracterização do estoque de edificações

Inicialmente foi realizada a caracterização do estoque de edificações a partir de uma base de dados que o representa. A base de dados foi obtida por meio da solicitação de informações junto às secretarias de educação estaduais. As solicitações foram feitas por meio do portal da transparência com a prerrogativa da Lei de Acesso à Informação. Para cada unidade escolar, foram disponibilizadas informações sobre o consumo de energia no ano de 2018, área construída total, localidade e número de alunos. Foram feitas solicitações em todas as 27 unidades federativas do Brasil, porém, foram recebidas informações de 17 estados. O total de dados recebido foi correspondente a 5.231 escolas de ensino fundamental e médio.

Filtros para retirada de valores espúrios e dados incompletos foram aplicados para sanear a amostra de dados do estoque. Só foram considerados na análise os elementos da amostra que continham informações completas, ou seja, que continham informações de consumo de energia completa no ano de 2018, área construída, número de alunos e localização. Foram considerados valores espúrios aqueles que excederam o limite superior de 1,5 vezes o quartil superior acrescido da diferença entre quartil superior e inferior. A base de dados tratada resultou em 2.445 escolas distribuídas nas zonas bioclimáticas de 1 a 7. Não foi disponibilizado nenhum dado consistente de escolas localizadas na zona bioclimática 8. A Tabela 1 apresenta uma síntese da quantidade de dados em cada zona bioclimática.

Tabela 1 – Quantidade de edificações na base de dados para cada Zona Bioclimática.

Zona Bioclimática	Quantidade de escolas	Percentual (%)
1	5	0,2
2	521	21,3
3	1153	47,2
4	210	8,6
5	266	10,9
6	283	11,6
7	7	0,3
Total	**2.445**	**100,00**

3.2. Análise dos indicadores de intensidade de uso de energia

Dois indicadores de intensidade de uso de energia (EUI) foram utilizados para caracterizar o estoque de edificações em análise. O primeiro EUI foi calculado a partir da razão do consumo anual de energia pela área construída (kWh/m²/ano), e o segundo foi calculado a partir da razão do consumo anual de energia pelo número de alunos (kWh/aluno/ano). Apesar de semelhantes, esses indicadores representam grandezas diferentes.

De forma a caracterizar o estoque com uma abordagem estatística, foram desenvolvidos os histogramas para cada um dos indicadores calculados. Um teste estatístico de Anderson-Darling foi aplicado para testar a aderência dos dados de EUI à distribuição normal, considerando-se 5% de nível de significância e Hipótese nula (H0) de que não há semelhança com a distribuição normal. Ou seja, quando o p-valor do teste for menor que 0,05, há indicação de rejeição da Hipótese nula (H0), provando a aderência à normal. Notou-se que os histogramas seguem uma distribuição log-normal. Portanto, foi realizada uma

transformação nos dados de ambos EUI por meio da aplicação do logaritmo na base. Novamente os histogramas foram desenvolvidos, assemelhando-se à curva normal. O teste de Anderson-Darling foi repetido para os dados transformados.

A partir da base de dados com aderência à distribuição normal, pode-se dizer que as medidas de síntese estatística têm representatividade válida. Dessa forma, foram calculadas as medidas de síntese para cada indicador de EUI. As medidas de síntese foram: a média, a mediana, o desvio-padrão, o quartil superior (75% dos dados), o quartil inferior (25% dos dados), e os valores máximos e mínimos observados.

3.3 Análise de Variância

Um teste estatístico de análise de variância (ANOVA) foi realizado para verificar se as edificações escolares localizadas em diferentes zonas bioclimáticas apresentam diferença estatística significativa de consumo de energia.

Foram realizados dois testes ANOVA de um fator. No primeiro teste a variável resposta considerada foi o EUI em termos de área construída, e no segundo teste o EUI em termos de número de alunos. Em ambos os testes o fator variante considerado foi a variável "Zona Bioclimática", com sete tratamentos (Zona 1 a Zona 7). O nível de significância adotado foi de 5%, *i.e.*, nível de confiança de 95%. A hipótese nula (H_0) considera que não há diferença entre os EUIs dos tratamentos testados (zonas bioclimáticas), e a hipótese contrária (H_1) considera que há diferença. Há rejeição da Hipótese nula (H_0) quando o valor de probabilidade do teste (p-valor) for menor que o nível de significância (p-valor < 0,05). Confirma-se esta hipótese quando a estatística F calculada no teste é maior que o valor crítico da distribuição, considerando-se os mesmos graus de liberdade do teste. Os procedimentos de cálculo do teste ANOVA podem ser encontrados em Barbetta (1994). É importante salientar que o teste foi aplicado nos dados de EUI transformados em logaritmo, uma vez que é necessário que haja distribuição normal para que o teste tenha eficácia estatística.

3.4 *Benchmarking* estatístico

Nesta etapa foi realizado um *benchmarking* estatístico, de forma a comparar o nível de desempenho das edificações existentes na amostra. Os dados foram classificados segundo os dois indicadores, ou seja, com o consumo energético anual em função da área construída e em função do número de alunos da escola.

Considerando a normalidade da distribuição transformada em logaritmo, o método adotado partiu da proposta realizada por Veloso, Souza e Santos (2020). A partir da distribuição de dados da amostra, são estabelecidos limites para classes de desempenho energético de "A" até "E", da melhor para a pior classificação, respectivamente. Os limites de cada classe são coincidentes com percentis do estoque de 20%, e são apresentados na Tabela 2, sendo (μ) a média e (σ) o desvio padrão da amostra.

Tabela 2 - Limites entre cada classificação de desempenho energético segundo Veloso, Souza e Santos (2020).

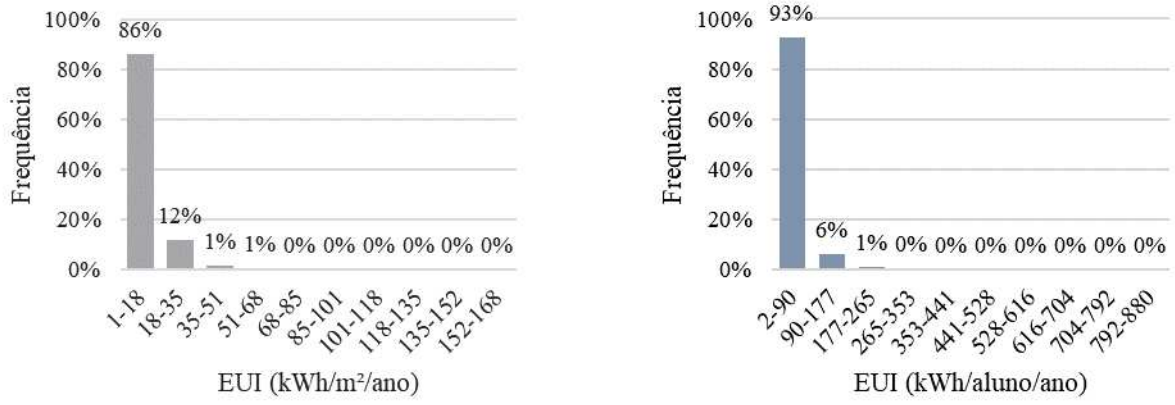
Entre A e B	Entre B e C	Entre C e D	Entre D e E
$\mu - 0{,}843 \times \sigma$	$\mu - 0{,}245 \times \sigma$	$\mu + 0{,}245 \times \sigma$	$\mu + 0{,}843 \times \sigma$

Caso a distribuição da amostra se adequasse perfeitamente à distribuição normal, cada uma das classes de "A" a "E" conteria exatamente 20% da amostra. Entretanto, existem pequenas variações devido à variação da distribuição dos dados frente à distribuição normal. É importante salientar que a análise estatística realizada se refere ao consumo energético anual. Aspectos subjetivos relativos ao desempenho térmico ou lumínico da edificação não foram levados em consideração, uma vez que são aspectos que necessitam de uma coleta de dados específica de conforto dos usuários.

4. RESULTADOS

4.1 Análise estatística do estoque de edificações

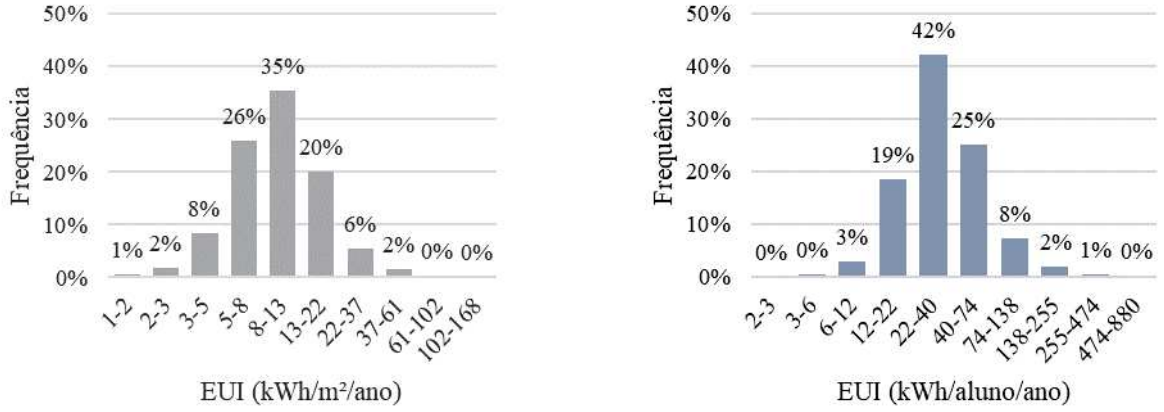
A base de dados que representa o estoque de edificações é constituída por uma amostra de 2.445 edificações com informações sobre área construída, consumo anual de energia, número de alunos. O histograma dos EUIs em termos de área construída e em termos de número de alunos pode ser visualizado na Figura 1. Visualmente, pode-se notar que os dados não seguem uma distribuição normal. Um teste de Anderson-Darling confirmou essa suposição, uma vez que o p-valor foi de $1{,}09 \times 10^{-9}$ para EUI em função da área construída e $3{,}29 \times 10^{-16}$ para EUI em função do número de alunos, rejeitando-se a hipótese nula (H_0) a 5% de significância. Observa-se, no entanto, que há uma possibilidade de os dados seguirem uma distribuição log-normal.



(a) (b)

Figura 1 – Histograma dos indicadores de EUI por (a) área construída e (b) número de alunos.

Então, uma transformação logarítmica foi aplicada aos indicadores de EUI. A Figura 2 apresenta os histogramas dos indicadores de EUI em função da área construída e do número de alunos com essa transformação. O teste de aderência à normal de Anderson-Darling foi reaplicado na amostra transformada, resultando em um p-valor de 0,12 para EUI em função de área e 0,31 para EUI em função do número de alunos, indicando aceitação da hipótese H_0, ou seja, há evidência estatística de que os dados seguem uma distribuição normal, uma vez que o p-valor é maior que 5%. Nota-se que a maior parte das edificações possui EUI por área construída entre 8 e 13 kWh/m²/ano, e EUI por número de alunos entre 22 e 40 kWh/aluno/ano.



(a) (b)

Figura 2 – Histograma dos indicadores de EUI por (a) área construída e (b) número de alunos com transformação em logaritmo (valores foram transformados para categorização e, após categorização, transformados novamente para aparecer nos intervalos como valores de EUI sem ser logaritmo).

A partir dessa confirmação, as medidas de síntese estatística são aplicáveis aos dados transformados. A Tabela 3 apresenta as medidas de síntese para ambos os indicadores. Enfatiza-se que apesar de serem utilizados os valores em logaritmo para cálculo das medidas de síntese, na tabela são apresentados os valores convertidos de volta à sua unidade inicial, de forma a proporcionar análise prática dos resultados.

Tabela 3 – Medidas de síntese estatística para os indicadores de EUI por área construída e por número de alunos.

Parâmetro	EUI por área construída (kWh/m²/ano)	EUI por número de alunos (kWh/aluno/ano)
Média	9,79	34,17
Desvio Padrão	1,82	1,94
Mínimo	1,07	1,82
Quartil inferior (25% dos dados)	6,80	22,83
Mediana (50%)	9,81	32,35
Quartil superior (75%)	14,05	49,55
Máximo	28,68	101,80

Considerando o EUI por área construída, o valor máximo da amostra tratada é de 28,68 kWh/m²/ano e o mínimo é de 1,07 kWh/m²/ano, resultando em uma variação grande de observações, de 27,61 kWh/m²/ano. Ainda, a maioria dos valores obtidos (75%) encontram-se abaixo de 14,05 kWh/m²/ano. Ressalta-se que esta amostra já passou por um tratamento de retirada de valores espúrios. Para o EUI por número de alunos, o valor máximo foi de 101,80 kWh/aluno/ano, com um alcance de 99,98 kWh/aluno/ano. Correlacionando os dois indicadores analisados, percebe-se que das 611 edificações escolares com o maior valor de EUI por m², 328 (53,68%) delas também estavam presentes no quartil superior do EUI por número de alunos. Isso demonstra que, apesar de não haver uma correlação direta entre a área construída e o número de alunos (correlação de Pearson de 0,56), há uma relação indireta entre os indicadores de consumo de energia por esses aspectos. De fato, há uma influência significativa de outros aspectos no consumo de energia, como a localidade onde a edificação está inserida, conforme também apontado por outros estudos da área (SARAIVA *et al.*, 2019).

De forma a explorar a relação do consumo de energia a nível do estoque em função da localidade da edificação, a Figura 3 apresenta o diagrama de caixas do EUI por área construída para cada zona bioclimática analisada.

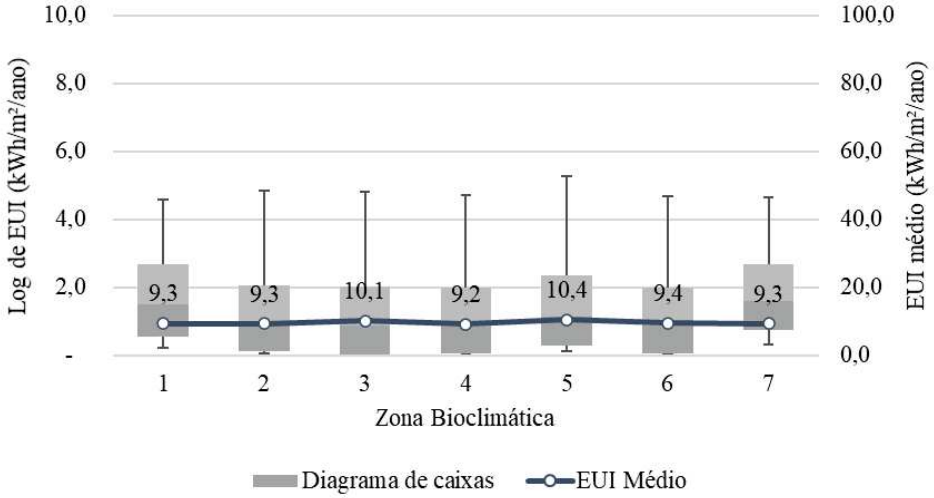


Figura 3 – Diagrama de caixas da variável EUI por área construída para diferentes zonas bioclimáticas.

A partir da Figura 3 pode-se verificar que os valores médios, as medianas e os limites dos quartis variaram pouco entre as zonas bioclimáticas. As zonas bioclimáticas 1 e 7 foram as que apresentaram o maior limite do quartil superior, o que pode estar associado à escassez de dados observados nestas zonas. Entretanto, o maior valor máximo foi observado na zona bioclimática 5. Em relação ao valor mínimo, o menor valor identificado foi na zona bioclimática 3. A zona bioclimática 5 foi a que apresentou maior distância entre a mediana e o valor máximo.

Apesar de haver pouca variação entre os EUIs médios, é necessário testar se a variação entre os agrupamentos das zonas é mais significativa do que a variação dentro do agrupamento das zonas. Para isso, uma ANOVA foi realizada. A Tabela 4 apresenta o resumo da ANOVA para o EUI em termos de área construída. Enfatiza-se que foram utilizados os valores em escala logarítmica para esta análise.

Tabela 4 – Resumo da Análise de Variância do EUI por área construída para diferentes Zonas Bioclimáticas.

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	Estatística F	P-Valor	F máximo
Zona Bioclimática	0,9	6	0,149	2,217	0,0389	2,102
Resíduos	161,9	2405	0,067	-	-	-
Total	**162,8**	**2411**	-	-	-	-

Portanto, considerando um nível de significância de 5%, pode-se que dizer que o teste estatístico rejeitou a hipótese nula (H_0), uma vez que o valor de probabilidade do teste foi menor que 5% (p-valor igual a 0,0389). Portanto, é possível afirmar que os valores médios de EUI por área construída não podem ser considerados uniformes para todas as Zonas Bioclimáticas.

A Figura 4 apresenta o diagrama de caixas para o EUI por número de alunos para cada zona bioclimática analisada.

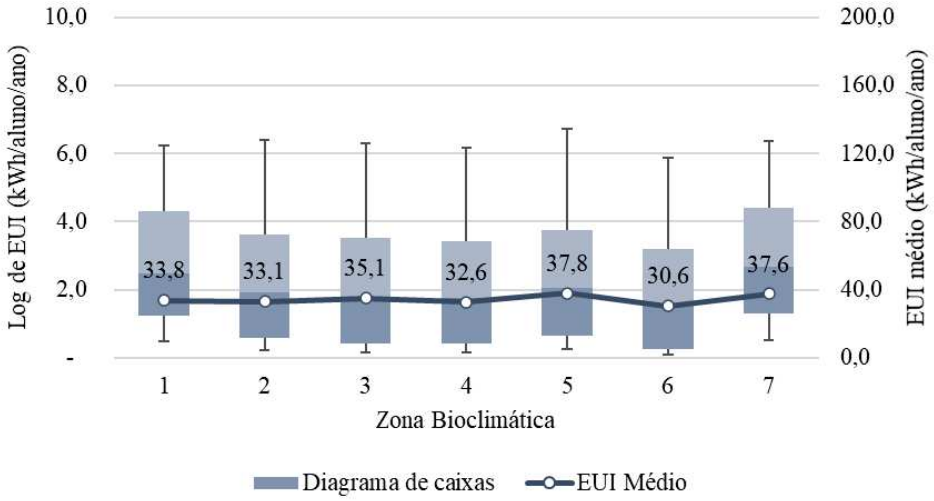


Figura 4 – Diagrama de caixas da variável EUI por número de alunos para diferentes zonas bioclimáticas.

A partir da Figura 4, há maior clareza da variação do consumo de energia entre as localidades estudadas. Nota-se que o EUI médio por número de alunos variou de 30,6 até 37,8 kWh/aluno/ano. A Tabela 5 apresenta o resumo da ANOVA para o EUI em termos de número de alunos, testando a diferença entre EUIs para diferentes Zonas Bioclimáticas.

Tabela 5 – Resumo da Análise de Variância do EUI por número de alunos para diferentes Zonas Bioclimáticas.

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	Estatística F	P-Valor	F máximo
Zona Bioclimática	1,52	6	0,253	3,069	0,005	2,102
Resíduos	198,3	2405	0,082	-	-	-
Total	**199,82**	**2411**	-	-	-	-

Similarmente para o caso do EUI por área construída, na ANOVA para EUI por número de alunos o teste estatístico também rejeitou a hipótese nula (H_0), uma vez que o valor de probabilidade do teste foi menor que 5% (p-valor igual a 0,005). Então, há evidência estatística de que os valores médios de EUI por número de alunos também não podem ser considerados uniformes para todas as Zonas Bioclimáticas. É importante salientar que as ZBs com maior diferença em relação às demais também são aquelas que apresentaram menos dados na amostra. No entanto, não se pode esperar que haja quantidade equivalente de edificações nas diferentes zonas bioclimáticas brasileiras porque a própria cobertura do território nacional pelas zonas bioclimáticas é muito diferente. Além disso, outros fatores devem ser considerados, como a urbanização. Por exemplo, apesar de a maior parte do território estar na Zona 8, esta zona é composta por boa parte de áreas não urbanizadas ou não habitadas.

4.2 *Benchmarking* estatístico

A classificação do desempenho das edificações por meio dos indicadores explorados pode ser feita de maneira simples a partir do método de Veloso, Souza e Santos (2020). Neste estudo, esta abordagem foi adotada para estabelecer as classes de desempenho em cinco grupos (de "A" a "E"), a partir de uma abordagem baseada nos dados. Foram considerados como os limites entre as classes os percentis da distribuição de dados. Os resultados são apresentados para o indicador de EUI em função da área construída por meio da Tabela 6.

Tabela 6 – *Benchmarks* estatísticos por Normalização Simples, em função do indicador EUI por área construída.

Classe	Limite Inferior		Limite Superior		Quantidade de dados	
	Log de EUI log(kWh/m²/ano)	EUI kWh/m²/ano	Log de EUI log(kWh/m²/ano)	EUI kWh/m²/ano	Número	Porcentagem
A	0,03	1,07	0,77	5,91	422	17,50%
B	0,77	5,91	0,93	8,46	541	22,44%
C	0,93	8,46	1,05	11,34	504	20,90%
D	1,05	11,34	1,21	16,22	510	21,15%
E	1,21	16,22	2,23	168,41	434	18,00%

Pode-se perceber na Tabela 6 que a maior porcentagem dos dados está concentrada na classificação B e a menor na classificação A. O consumo limite para pertencer ao nível A é consideravelmente baixo, de 5,91 kWh/m²/ano, mesmo para a tipologia escolar. Pode-se inferir que as escolas presentes nesse nível ou possuem uma área construída muito elevada em relação ao restante da amostra ou não possuem nenhum equipamento com alto consumo de energia, como sistema para condicionamento de ambientes. Há também a possibilidade da existência de sistemas altamente eficientes. Estudos que determinam valores típicos em outros países com climas parecidos com o do Brasil apresentaram consumos médios entre 10 e 86 kWh/m²/ano na Itália e entre 53 e 69 kWh/m²/ano na Grécia (PEREIRA *et al.*, 2014).

A Tabela 7 apresenta o resultado da determinação dos *benchmarks* para o EUI em função do número de alunos.

Tabela 7 – *Benchmarks* estatísticos por Normalização Simples, em função do indicador EUI por número de alunos.

Classe	Limite Inferior		Limite Superior		Quantidade de dados	
	Log de EUI log(kWh/aluno/ano)	EUI kWh/aluno/ano	Log de EUI log(kWh/aluno/ano)	EUI kWh/aluno/ano	Número	Porcentagem
A	0,26	1,82	1,29	19,54	409	16,96%
B	1,29	19,54	1,46	29,05	607	25,18%
C	1,46	29,05	1,60	40,20	547	22,69%
D	1,60	40,20	1,78	59,75	447	18,54%
E	1,78	59,75	2,94	879,58	401	16,63%

A partir da Tabela 7 observa-se que comportamento da amostra por este indicador é semelhante ao observado no indicador por área construída, com maior concentração de dados na classificação B, porém, com menor concentração na classe E. Os consumos da classe E, entre 59,75 e 879,58 kWh/aluno/ano, por exemplo, são bastante elevados e abrangem um grande intervalo, justificando uma análise mais detalhada que pode inclusive levar a sugestões de melhoria do uso de energia.

Pela distribuição de dados observada, nos casos dos dois indicadores a porcentagem de dados em cada classificação foi próxima de 20%. No caso do consumo energético anual dividido pela área construída, essa proporção é melhor distribuída, indicando que essa amostra tem distribuição mais semelhante à normal.

Apesar de fornecer consumos típicos e uma classificação primária, este método de normalização simples ainda é rudimentar para uma classificação definitiva do desempenho energético de edificações. Para conclusões mais definitivas, é necessário um estudo mais aprofundado das edificações do estoque, para conhecer os motivos que levaram às classificações. Assim, também será possível observar se a classificação atribuída a cada edificação representa a sua realidade, em consonância com as demais edificações de ensino fundamental e médio do país. Métodos de *benchmarking* mais robustos levam em consideração outros aspectos na classificação do desempenho, como características construtivas, padrões de operação e sistemas presentes na edificação (GERALDI E GHISI, 2020a). Além disso, evidencia-se que a análise estatística identificou diferenças entre os EUIs das edificações de acordo com as zonas bioclimáticas, ou seja, a normalização simples é um método que não permitiu a separação de *benchmarks* por zona bioclimática, registrando-se uma limitação do método. Outros métodos que consideram variáveis climáticas como regressão linear, podem enriquecer a classificação proposta. É importante ressaltar que estes métodos mais robustos não foram utilizados devido à escassez de informações dos dados. Os dados utilizados eram simples e procurou-se utilizar uma abordagem adequada para a quantidade de informação disponível. De fato, essa é uma limitação comumente apontada em estudos desse tipo no Brasil (VELOSO, SOUZA E SANTOS, 2020). Dessa forma, sugere-se recorrer a ferramentas de simulação computacional para auxiliar a desenvolver *benchmarkings* mais robustos.

5. CONCLUSÕES

Este artigo propôs um *benchmarking* estatístico para o consumo energético de edificações escolares de ensino fundamental e médio da rede estadual brasileira. De maneira geral, concluiu-se que o método de *benchmarking* estatístico é válido como uma abordagem inicial para caracterização do estoque e determinação de edificações que podem ter seu desempenho energético otimizado. Apesar de válido como análise inicial, o método é simplificado e pode ser melhorado em estudos futuros.

Um dos tópicos que merece atenção é a variação dos indicadores de consumo de acordo com os climas onde as edificações estão inseridas. As análises evidenciaram a importância de considerar indicadores climáticos na determinação de equações de *benchmarking* no Brasil, uma vez que divergências foram

encontradas comparando-se edificações de diferentes zonas bioclimáticas. Recomenda-se a determinação de equações específicas para cada grupo climático nacional ao invés da proposição de uma abordagem geral válida para todo o país. Para a determinação dessas equações específicas, bases de dados mais diversas e extensas são necessárias. A colaboração de diferentes participantes desse setor é necessária, pois não há bases de dados integradas com informações sobre todos os municípios nacionais. A obtenção de dados descentralizados é dispendiosa e, muitas vezes, pouco informativa.

Além disso, este estudo também evidenciou algumas divergências entre o indicador comumente utilizado para a caracterização do consumo nas edificações (em função da área construída) e o indicador que leva em consideração o número de alunos em cada edificação educacional. As variáveis contextuais das edificações também podem ser testadas em estudos futuros para a elaboração de equações de *benchmarking* mais complexas e coerentes com a variabilidade vista no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBETTA, Pedro Alberto. **Estatística aplicada às ciências sociais**. 9ª edição. Florianópolis. Editora UFSC. 1994.

BOEMI, S. N. et al. A statistical approach to the prediction of the energy performance of hotel stock. **International Journal of Ventilation**, v. 10, n. 2, p. 163–172, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1080/14733315.2011.11683945

BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L.M. Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 734–755, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.018

BORGSTEIN, Edward; LAMBERTS, Roberto. Desenvolvimento de benchmarks nacionais de consumo energético de edificações em operação. **Comunicação Técnica**. v. 1, p. 15, 2014. Disponível em: http://www.cbcs.org.br/website/comunicacao-tecnica/show.asp?ppsCode=F7DB9C2C-E746-423C-8759-3922567EE4A5

BORGSTEIN, Edward H.; LAMBERTS, Roberto. Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bank branches in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 82–91, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.028

BRASIL. Balanço energético nacional 2018: Ano base 2019. 2020.

BUCK, J.; YOUNG, D. The potential for energy efficiency gains in the Canadian commercial building sector: A stochastic frontier study. **Energy**, v. 32, n. 9, p. 1769–1780, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.11.008

BURMAN, Esfand; KIMPIAN, Judit; MUMOVIC, Dejan. Building Schools for the Future: Lessons Learned From Performance Evaluations of Five Secondary Schools and Academies in England. **Frontiers in Built Environment**, v. 4, n. April, p. 1–16, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00022

CHUNG, William. Review of building energy-use performance benchmarking methodologies. **Applied Energy**, v. 88, n. 5, p. 1470–1479, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.022

CHUNG, William; YEUNG, Iris M.H. Benchmarking by convex non-parametric least squares with application on the energy performance of office buildings. **Applied Energy**, v. 203, p. 454–462, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.023

DE WILDE, Pieter. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. **Automation in Construction**, v. 41, p. 40–49, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.009

EBC IEA. Annex 53 - Total energy use in buildings - Energy performance analysis Separate Document Volume VI. **Final Report Annex 53**. 2013. Disponível em: http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user_upload/images/Pictures/EBC_Annex_53_Appendix_Volume_6.pdf.

GERALDI, Matheus Soares; GHISI, Enedir. Building-level and stock-level in contrast : A literature review of the energy performance of buildings during the operational stage. **Energy and Buildings**, v. 211, p. 109810 Contents, 2020a. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109810

GERALDI, Matheus Soares; GHISI, Enedir. Mapping the energy usage in Brazilian public schools. **Energy and Buildings**, v. 224, p. 110209, 2020b. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110209

GOLDSTEIN, David B.; ELEY, Charles. A classification of building energy performance indices. **Energy Efficiency**, v. 7, n. 2, p. 353–375, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12053-013-9248-0

HONG, Sung Min et al. Improved benchmarking comparability for energy consumption in schools. **Building Research and Information**, v. 42, n. 1, p. 47–61, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1080/09613218.2013.814746

KIM, Tae Woo et al. The study on the Energy Consumption of middle school facilities in Daegu, Korea. **Energy Reports**, v. 5, p. 993–1000, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.07.015

KOO, Choongwan; HONG, Taehoon. Development of a dynamic operational rating system in energy performance certificates for existing buildings: Geostatistical approach and data-mining technique. **Applied Energy**, v. 154, p. 254–270, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.003

LEE, Wen Shing. Benchmarking the energy efficiency of government buildings with data envelopment analysis. Energy and Buildings, [s. l.], v. 40, n. 5, p. 891–895, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.07.001

LEE, Wen Shing. Benchmarking the energy performance for cooling purposes in buildings using a novel index-total performance of energy for cooling purposes. **Energy**, v. 35, n. 1, p. 50–54, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.08.026

LOURENÇO, Patrícia; PINHEIRO, Manuel Duarte; HEITOR, Teresa. From indicators to strategies: Key Performance Strategies for sustainable energy use in Portuguese school buildings. **Energy and Buildings**, v. 85, p. 212–224, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.025

MARRONE, Paola; GORI, Paola. Energy Benchmarking in Educational Buildings through Cluster Analysis of Energy Retrofitting. **Energies**, p. 1–20, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en11030649

MENG, Ting; HSU, David; HAN, Albert. Estimating energy savings from benchmarking policies in New York City. **Energy**, v. 133, p. 415–423, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.148

MONCADA LO GIUDICE, G. et al. Analysis of energy performance of school building stock in Rome. WIT **Transactions on Ecology and the Environment**, v. 179, p. 121–129, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.2495/SC130101

ÖSTERBRING, Magnus et al. Stakeholder Specific Multi-Scale Spatial Representation of Urban Building-Stocks. ISPRS **International Journal of Geo-Information**, v. 7, n. 5, p. 173, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ijgi7050173

PAPADOPOULOS, Sokratis; KONTOKOSTA, Constantine E. Grading buildings on energy performance using city benchmarking data. **Applied Energy**, v. 233–234, n. September 2018, p. 244–253, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.053

PEREIRA, Luísa Dias et al. Energy consumption in schools - A review paper. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 911–922, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.010

SALLEH, Mohd Najib Mohd; KANDAR, Mohd Zin; SAKIP, Siti Rasidah Md. Benchmarking for Energy Efficiency on School Buildings Design: A Review. Procedia - **Social and Behavioral Sciences**, v. 222, p. 211–218, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.149

SARAIVA, Tatiana Santos et al. Comparative study of comfort indicators for school constructions in sustainability methodologies: Schools in the amazon and the southeast region of Brazil. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 19, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su11195216

SCOFIELD, John H.; DOANE, Jillian. Energy performance of LEED-certified buildings from 2015 Chicago benchmarking data. **Energy and Buildings**, v. 174, p. 402–413, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.019

TAYLOR, Jonathon et al. Towards a framework to evaluate the 'total' performance of buildings. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 39, n. 5, p. 609–631, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1177/0143624418762662

VELOSO, Ana Carolina de Oliveira; GONÇALVES DE SOUZA, Roberta Vieira; DOS SANTOS, Felipe Nunes. Energy benchmarking for office building towers in mild temperate climate. **Energy and Buildings**, v. 222, p. 12–14, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110059

WANG, Jen Chun. Energy consumption in elementary and high schools in Taiwan. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 1107–1116, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.254

YANG, Zheng; ROTH, Jonathan; JAIN, Rishee K. DUE-B: Data-driven urban energy benchmarking of buildings using recursive partitioning and stochastic frontier analysis. **Energy and Buildings**, v. 163, p. 58–69, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.040

ZINZI, Michele et al. Deep energy retrofit of the T. M. Plauto School in Italy—A five years experience. **Energy and Buildings**, v. 126, p. 239–251, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.030

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa. Além disso, os autores agradecem a todas as secretarias estaduais de educação que colaboraram com a disponibilidade de dados.